Critério de Estabilidade de Nyquist

Análise de Estabilidade em Sistemas de Controle Realimentados

Amina José Selemane | Aires Chale Momade | Eduardo Magaia Bramugi | Justin Mwangabanto

Sistemas de Controlo Automático 2 | Universidade Rovuma

Índice

- Estabilidade em Sistemas de Controle
- Evolução Histórica da Análise de Estabilidade
- Sistemas em Malha Aberta e Malha Fechada
- Dedução do Critério de Nyquist
- O Diagrama de Nyquist
- Aplicações Industriais
- Vantagens e Limitações
- Conclusões

Estabilidade em Sistemas de Controle

O que é Estabilidade?

Um sistema é estável quando sua resposta permanece limitada sempre que a entrada também permanece limitada.

Importância

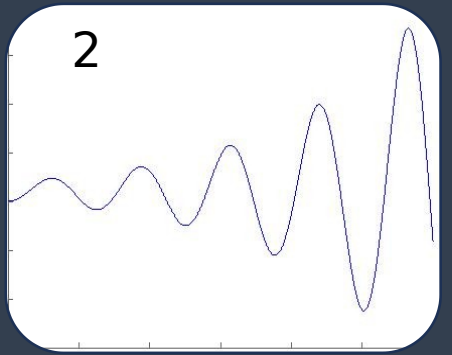
- Motores elétricos mantêm velocidade constante
- Aeronaves permanecem em voo controlado
- Robôs executam movimentos preci
- Sistemas elétricos mantêm tensão adequada

Consequências da Instabilidade

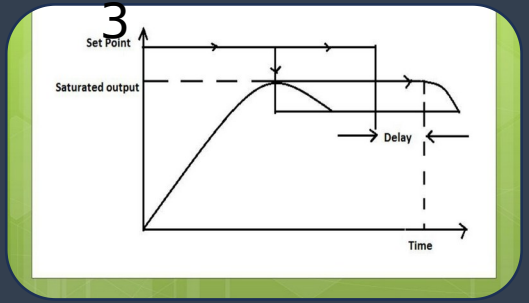
1. Oscilações contínuas
2. Aumento progressivo da amplitude da resposta
3. Saturação dos atuadores
4. Falhas operacionais
5. Danos aos equipamentos
6. Riscos à segurança das pessoas

1

2



3



4

5

6

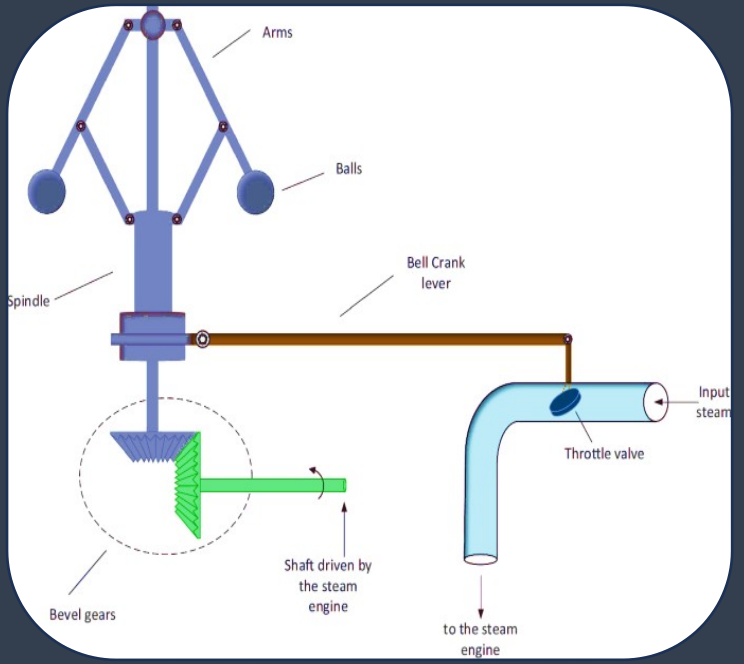
Evolução Histórica

Primeiros Passos (Séc. XIX)

- James Clerk Maxwell, Edward Routh, Aleksandr Lyapunov
- Fundamentos matemáticos dos sistemas dinâmicos

Era Moderna (Décadas 1920-1930)

- Harry Nyquist e Hendrik Wade Bode (Bell Telephone)
- Desenvolvimento de técnicas de análise em frequência
- Origem dos Diagramas de Nyquist e Bode



Marcos Técnicos

Maxwell a

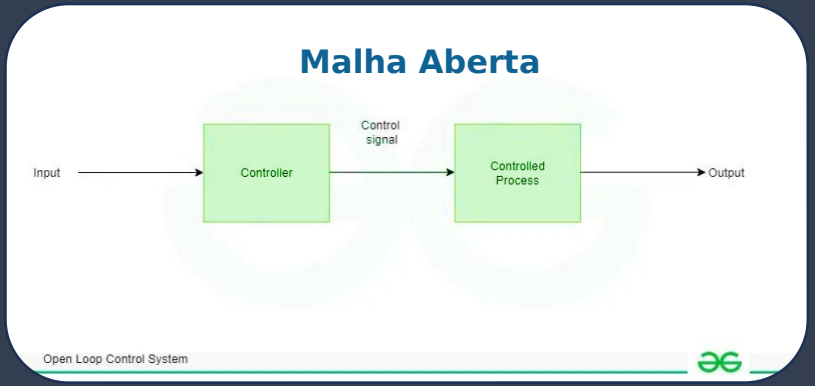
Sistemas em Malha Aberta Vs Malha Fechada

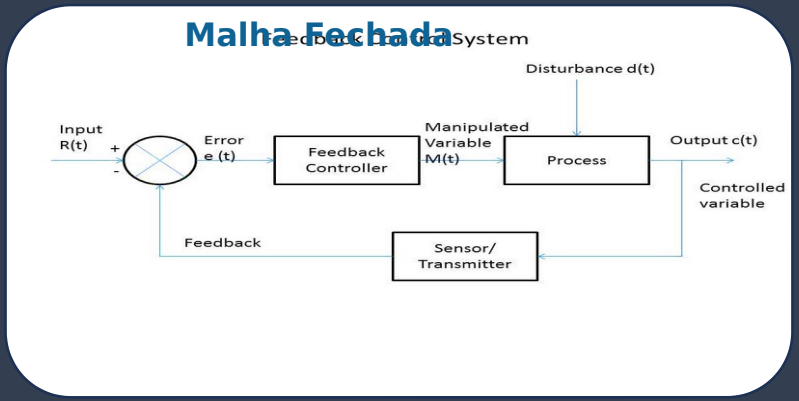
Malha Aberta

- Saída não influencia entrada
- Sem realimentação automática
- Simples, mas sem compensação de perturbações

Malha Fechada

- Saída medida e comparada com valor desejado
- Realimentação automática
- Melhor precisão e robustez, maior complexidade





Fundamentos do Critério de Nyquist

Relação Fundamental

Os polos de 1 + G(s)H(s) são os mesmos que os polos de G(s)H(s) (malha aberta)

Os zeros de 1 + G(s)H(s) são os mesmos que os polos de T(s) (malha fechada)

Objetivo

Determinar quantos polos em malha fechada estão no semiplano direito do plano s.

De forma simples, ele serve para verificar:

- se o sistema é **estável**;
- se o sistema é **instável**;
- se o sistema está **no limite da estabilidade**, podendo apresentar **oscilações contínuas**;

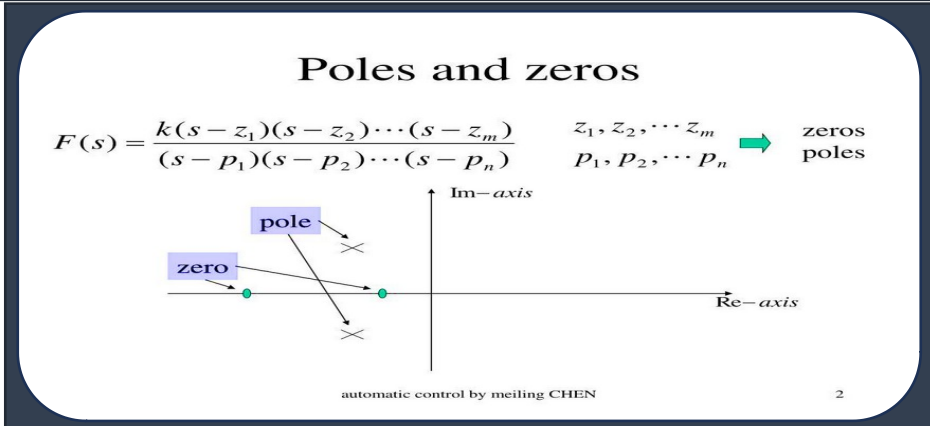
O Plano Complexo

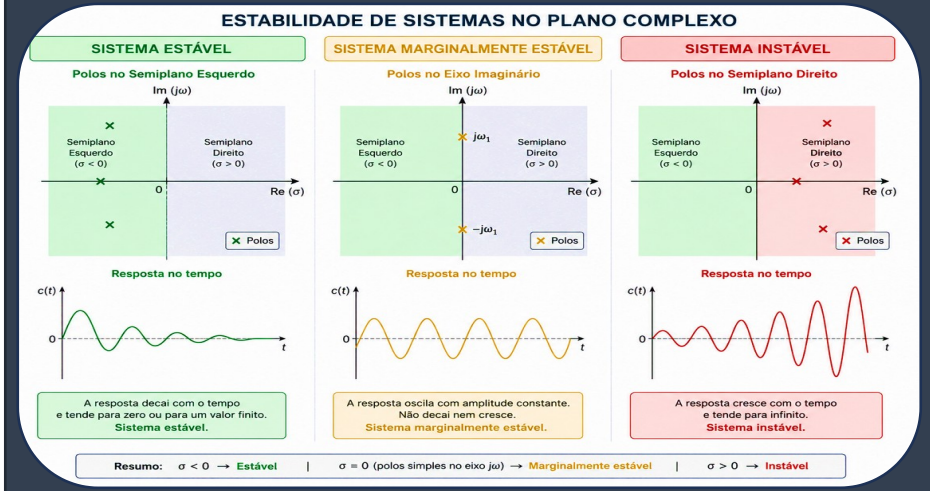
Significado

Representa a localização dos polos e zeros de funções de transferência

Divisões

- Semiplano esquerdo: sistema estável
- Eixo imaginário: limite de estabilidade (marginalmente estável)
- Semiplano direito: sistema instável





O Contorno de Nyquist

Definição

Caminho fechado percorrido no plano s que envolve o semiplano direito

Composição

- Eixo imaginário positivo
- Semicircunferência de raio infinito
- Eixo imaginário negativo

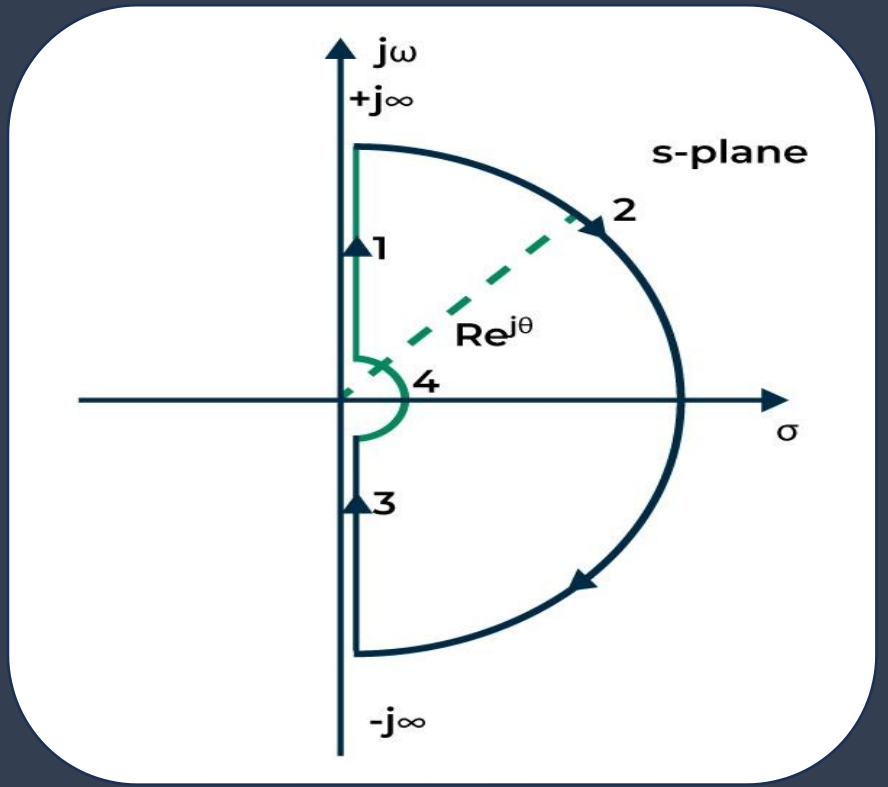


Diagrama de Nyquist

O que é?

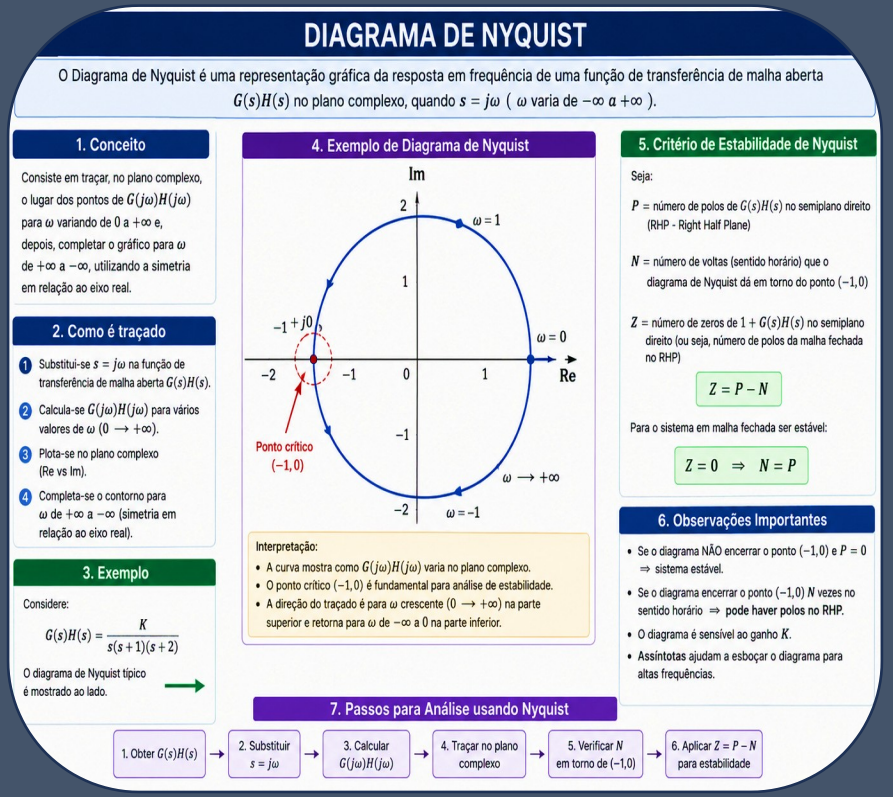
Curva produzida pelo mapeamento do contorno de Nyquist através da função G(s)H(s)

Ponto Crítico

O ponto (-1, 0) é central: a quantidade e direção dos encadeamentos em torno deste ponto determinam a estabilidade.

Interpretação

- Não envolve (-1,0): sistema estável (se P=0)
- Envolve (-1,0): indica polos instáveis em malha fechada



Critério de Estabilidade de Nyquist

Fórmula Fundamental

N = Z - P, onde:

- N = número de encadeamentos do ponto (-1, 0)
- Z = número de zeros de 1 + G(s)H(s) no semiplano direito
- P = número de polos de G(s)H(s) no semiplano direito

Estabilidade

Sistema estável se Z = 0, ou seja, N = -P

Resposta em Frequência

Conceito

Comportamento do sistema quando submetido a entradas senoidais de diferentes frequências

Aplicação no Critério de Nyq

- Permite análise sem cálculo explícito de raízes
- Fornece informações sobre margem de ganho e fase
- Complementa o conhecimento do sistema realimentado

Margem de Ganho e Margem de Fase

Margem de Ganho

Quanto pode aumentar o ganho antes do sistema ficar instável

Margem de Fase

Quanto pode variar a fase antes do sistema ficar instável

Importância

- Indicadores de robustez do sistema
- Essenciais para projeto de controladores

Aplicações na Automação Industrial

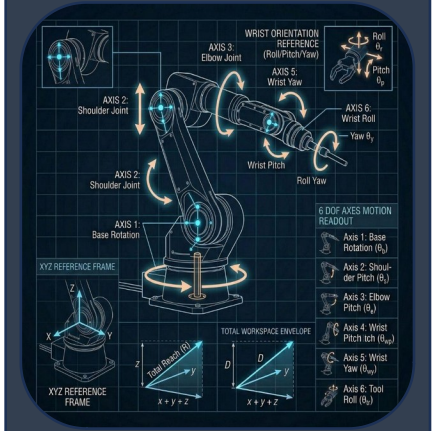
Controle de motores e velocidade de

Ele consiste em uma **velocidade angular** regular de um eixo (rotor) para atingir o valor desejado, mesmo com perturbações.

Sistemas de manufatura automatizada

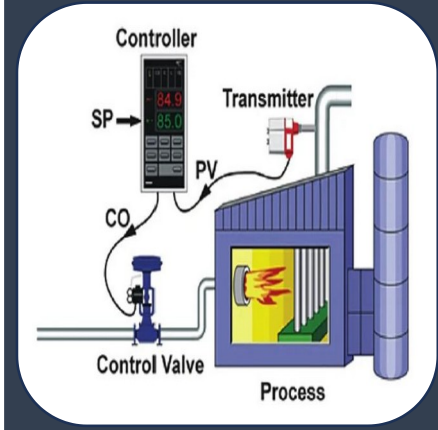
Os **Sistemas de**são sistemas industriais que utilizam **máquinas, sensores e controladores** para realizar processos produtivos com **mínima**

Robôs industriais e braços articulados



o **critério de Nyquist** é usado principalmente para verificar se o sistema de controlo consegue manter o robô **estável** enquanto movimenta os seus

Regulação de temperatura em processos industriais



Significa **manter a temperatura de um processo próxima de um valor desejado**, mesmo quando existem perturbações

Aplicações em Sistemas Elétricos e Telecomunicações

Sistemas Elétricos de Potência

- Regulação de frequência e tensão
- Proteção contra instabilidades

Telecomunicações

- Amplificadores com realimentação
- Sistemas de transmissão de dados
- Redes de comunicação estáveis

Aplicações em Robótica e Aeronáutica

Robótica

- Controle de braços robóticos
- Sistemas de locomoção

Aeronáutica

- Sistemas de piloto automático
- Controle de estabilidade de aeronaves
- Sistemas de navegação

Vantagens do Critério de Nyquist

Válido para sistemas contínuos e discretos

um controlador de temperatura analógico pode ser contínuo, enquanto o mesmo processo controlado por um computador pode ser discreto. Nos dois casos, Nyquist pode ser utilizado para estudar a estabilidade.

Análise sem cálculo explícito de raízes da equação característica

Quando queremos saber se um **sistema de controlo é estável**, uma maneira tradicional seria calcular os **polos da função de transferência de malha fechada**

Permite análise de sistemas com atrasos de transporte

Um **atraso de transporte** acontece quando existe um intervalo de tempo entre uma ação realizada no sistema e a resposta observada.

Vantagens do Critério de Nyquist

Fornece informações sobre margem de ganho e fase

O critério de Nyquist fornece informações sobre a margem de ganho e a margem de fase, permitindo avaliar não apenas se um sistema é estável, mas também o seu grau de segurança em relação à

Aplicável a sistemas não lineares (com certas restrições)

O critério de Nyquist pode contribuir para a análise de sistemas que apresentam determinadas não linearidades, desde que sejam consideradas algumas restrições.

Ferramenta fundamental para engenheiros de controle

O critério de Nyquist constitui uma ferramenta fundamental para engenheiros de controlo, pois permite analisar a estabilidade e o comportamento de sistemas de controlo antes da sua

Limitações do Critério de Nyquist

- Requer conhecimento de todos os polos de G(s)H(s)
- Interpretação gráfica pode ser subjetiva
- Dificuldade em sistemas com múltiplos atrasos
- Menos intuitivo que o Lugar Geométrico das Raízes para iniciantes
- Convergência numérica em sistemas de alta ordem

Conclusão

O Critério de Estabilidade de Nyquist é uma ferramenta fundamental da Engenharia de Controle moderna.

Permite análise de estabilidade em malha fechada a partir da resposta em frequência em malha aberta, sem necessidade de cálculo explícito de raízes.

Suas aplicações práticas vão desde automação industrial até sistemas aeroespaciais, tornando-o indispensável para o projeto de controladores confiáveis e robustos.

MUITO OBRIGADO PELA ATENÇÃO!

“Estuda, aprende e vive; porque, no fim da vida, até o sábio se torna aluno diante do desconhecido. E, se não sabes quem te espera do outro lado,